Vol.14, No.1, Spring 2025, pp.227-246 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Article DOI: 10.22067/geoeh.2024.87783.1480 Open Access

# Subsidence Monitoring in Railway Lines With LICSBAS Algorithm and Radar Interferometric Method (Case Study: Mashhad-Sarkhs Railway)

**Soroush Yasini[a], Hossein Etemadfard[b*]**

[a] Environmental engineering and science Graduate Student, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[b]Assistant Professor in GIS, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

## Article Info

**Article history**

**Received:**
*27 April 2024*
**Received in revised form:**
*3 September 2024*
**Accepted:** *3 October 2024*
**Available online:**
*21 March 2025*

**Keywords:**

Land subsidence, InSAR monitoring, Railway infrastructure, Groundwater depletion, Agricultural impacts, Risk assessment

## Abstract

In recent times, the increasing occurrence of subsidence has raised concerns, particularly in Iran's plains, urban regions, and transportation infrastructure. This study focuses on understanding how this phenomenon affects the Mashhad-Sarkhs railway, since it is located on the eastern end of Iran's rail network and serves as a vital rail link connecting to Central Asian nations, which are important trade partners. To assess the rate of subsidence along this route, we processed 151 radar images between 2017 and 2023, utilizing the new NSBAS algorithm and pre-processed data from COMET LiCSAR, to calculate the cumulative rate of land subsidence. Additionally**,** to reduce atmospheric effects on subsidence rate estimation, GACOS data was used. Following this, we created a land cover map of the study area with four land use classes using the Google Earth Engine to investigate the effects of land cover variations on subsidence. Finally, we generated a subsidence profile around the railroad and combined **it** with land use classes to visualize the correlation between croplands and subsidence occurrence in affected areas. InSAR results show three land subsidence zones along the rail line**,** with some areas experiencing subsidence exceeding 200 mm along the satellite line of sight. The results indicate a strong correlation between subsidence along the railway and farming within the rail corridor. Conversely, there were almost no signs of land subsidence outside the plains due to the absence of concentrated agricultural activities. In this study, the first 60 kilometers of the railroad, which contains more than 20 bridges, was identified as the most concerning subsidence zone along the rail line.

*Corresponding author : Dr. Hossein Etemadfard E-mail address: etemadfard@um.ac.ir

**How to cite this article:** Yasini, S., & Etemadfard, H. (2025). Subsidence Monitoring in Railway Lines With LICSBAS Algorithm and Radar Interferometric Method (Case Study: Mashhad-Sarkhs Railway). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(1), pp. 227-246. DOI: https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.87783.1480

**Extended Abstract**

## Introduction

Land subsidence, an environmental and geological phenomenon, arises from groundwater depletion and soil compaction due to human and natural factors, particularly in arid and semi-arid regions. In Iran, like many developing countries, excessive groundwater extraction to meet growing industrial, urban, and agricultural demands has a long history, exacerbating subsidence in eastern and central plains such as Mashhad, Neyshabur, and Jovin, worsened by recurring droughts. This phenomenon poses significant risks to infrastructure, including high-speed railways, roads, tunnels, and bridges, threatening economic development and safety due to potential human and financial losses. The Mashhad-Sarakhs railway, a critical transit corridor in northeastern Iran connecting **to** Central Asian networks, underscores the need for subsidence monitoring given its role in transporting goods and people. Radar interferometry (InSAR) offers a cost-effective, weather-independent method to monitor subsidence over large areas, unlike traditional techniques like leveling or GPS, though it faces challenges from topographic, atmospheric, and orbital errors. Advanced InSAR techniques, such as small baseline and permanent scatterer methods, enhance accuracy by reducing noise and improving coherence, while newer algorithms address gaps in data networks, especially in agricultural zones. This study investigates subsidence along the Mashhad-Sarakhs railway using modern InSAR approaches, aiming to identify high-risk zones in this vital infrastructure corridor.

## Material and Methods

The Mashhad-Sarakhs railway, approximately 195 km long with about 5 km extending beyond Iran's borders, is located in the northeasternmost part of the country between 59°38′ and 61°14′ east longitude and 36°1′ to 36°33′ north latitude. Operational since 1996, three years after project initiation, this route features three tunnels totaling around 6 km and includes 18 stations, 15 large bridges, and 386 medium to small bridges along its 2,700 m of bridge structures.

This study analyzed pre-processed Sentinel-1 radar imagery spanning January 2017 to 2023, covering a broad spatial area with interferograms and coherence data limited by perpendicular and temporal baselines of 200 meters and 50 days. The dataset was customized to the study region by masking irrelevant areas, and atmospheric effects were corrected using an external dataset to reduce noise that could obscure surface changes. Interferogram quality was assessed, discarding those with coherence below 0.3 due to snow, dense vegetation, or other disruptions, while unwrapping errors were detected and eliminated through a closed-loop phase method, removing interferograms exceeding an RMS threshold of 1.5. Displacement rates were calculated using a small baseline approach, assuming linear subsidence, with a reference point selected for minimal error. The standard deviation of rates was determined via repeated sampling to ensure reliability, and pixels exceeding noise thresholds were filtered out. To investigate the relationship between land cover and subsidence, a 2022 land cover map was generated using Sentinel-2 imagery at 10 × 10 m resolution with 11 classes via Google Earth Engine, then resampled to 101 × 101 m using the nearest-neighbor algorithm, and simplified into four classes: agricultural land, buildings, bare land, and grassland. Spatio-temporal filters were applied to minimize residual tropospheric, ionospheric, and orbital errors, yielding a robust time-series displacement dataset.

## Results and Discussion

To validate radar interferometry results, ground displacement data from GNSS stations were compared with InSAR-derived time-series data at a specific point along the Mashhad-Sarakhs railway (61.09°E, 36.32°N). The comparison revealed uplift at a rate of less than 2 mm/year, alongside seasonal displacement patterns linked to regional water resource variations, confirming the accuracy of InSAR outputs with ground-based measurements. Subsidence analysis along the 3-km buffer of the railway, spanning January 2017 to December 2022, utilized 151 refined Sentinel-1 images processed with the NSBAS algorithm. The highest subsidence was observed in the southeastern outskirts of Mashhad, within the first 20 km of the route, reaching 200–260 mm in the sensor's line of sight. Further along the path, at approximately 55 km and 190 km, maximum subsidence values of 140 mm and 75 mm were recorded, respectively. Other segments of the route showed negligible or no significant displacement. Agricultural activity was prevalent from the start to the 60-km mark and again from 180 km onward, correlating strongly with subsidence zones, particularly in the initial 0–10 km stretch where the most substantial subsidence occurred. In contrast, the middle sections of the route, dominated by barren land or sparse pastures, exhibited minimal agricultural presence and correspondingly low subsidence rates, highlighting a clear link between land use and subsidence patterns along the railway corridor.

## Conclusion

This study identified three significant subsidence zones along the Mashhad-Sarakhs railway, with the most pronounced occurring in the first 20 km (up to 200 mm) and another between 50–60 km (up to 150 mm), linked to intensive agricultural activity and groundwater over-extraction. Subsidence rates in southeastern Mashhad have risen from under 15 mm/year (2003–2009) to over 40 mm/year (2017–2023), correlating with declining groundwater levels. The initial 20-km segment, hosting 20% of the route's bridges, shows uneven and hazardous elevation changes, necessitating continuous monitoring. Integrating land use and hydrological data could enhance subsidence modeling, despite challenges from undocumented wells. Modern InSAR processing algorithms, offering improved accuracy and ease of use, proved effective for subsidence prediction and infrastructure risk management.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صص ۲۴۶-۲۲۷

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.87783.1480 دسترسی آزاد

# پایش فرونشست در حریم خطوط ریلی با الگوریتم LiCSBAS و روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: راه‌آهن مشهد-سرخس)

سروش یاسینی [۱]، حسین اعتمادفر [۲]*

[۱] دانش آموخته رشته علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۲] استادیار سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

**اطلاعات مقاله**

**تاریخچه مقاله**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۲

**کلمات کلیدی:**

فرونشست زمین

پایش اینسار

زیرساخت ریلی

کاهش آبهای زیرزمینی

اثرات کشاورزی

ارزیابی خطر

**چکیده**

در سال‌های اخیر پدیده فرونشست و وقوع آن در دشت‌ها، مناطق شهری و زیرساخت‌های حمل و نقل کشور ایران به نگرانی عمده‌ای تبدیل شده است. از این‌رو مطالعه حاضر، به بررسی اثرات این پدیده بر راه‌آهن مشهد-سرخس پرداخته است؛ چرا که این خط‌آهن با قرارگیری در منتهی‌الیه شرقی شبکه ریلی ایران و اتصال آن به کشورهای حوزه آسیای میانه، نقش مهمی در واردات و صادرات ایران ایفا می‌کند. در راستای بررسی میزان فرونشست این مسیر، با پردازش ۱۵۱ تصویر راداری سنجنده سنتینل-۱ به کمک الگوریتم نوین NSBAS و پیش‌پردازش داده‌ها در سامانه LiCSAR نرخ تجمعی فرونست در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد و به جهت تقلیل اثرات جوی از سامانه GACOS استفاده گردید. در گام بعد برای بررسی نقش پوشش اراضی بر فرونشست، به کمک سامانه متن‌باز Goolge earth engine نقشه پوشش اراضی محدوده مطالعاتی با چهار طبقه کاربری تولید شد. سپس پروفیل فرونشست در راستای ریل تولید و برای ارزیابی ارتباط فعالیت‌های کشاورزی و فرونشست، پروفیل فرونشست با طبقات کاربری اراضی تلفیق شد. نتایج پردازش InSAR نشان داد که سه پهنه فرونشستی در مسیر ریل وجود دارد؛ به طوری که برخی نواحی تا بیش از ۲۰۰ میلیمتر فرونشست داشته‌اند و محل وقوع فرونشست نیز عمدتاً در مناطق دارای فعالیت کشاورزی متمرکز قرار گرفته است. این مطالعه کیلومتر ۰ تا ۶۰ این مسیر را که دارای پل‌های روگذر و زیرگذر متعدد است، به عنوان پرمخاطره‌ترین بخش مسیر از نظر شدت فرونشست شناسایی کرد.

* نویسنده مسئول: دکتر حسین اعتمادفر E-mail: etemadfard@um.ac.ir

## مقدمه

فرونشست[1] پدیده‌ای محیط‌زیستی و زمین‌شناختی است که دلیل کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و به تبع آن، فشرده‌شدن خاک توسط پارامترهای انسانی و غیر انسانی رخ می‌دهد (Minh, Van Trung & Toan, 2015). این پدیده یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین پیامدهای استخراج گستره آب از منابع آب‌های زیرزمینی است (Gambolati & Teatini, 2015)، که در اغلب مناطق کره زمین به خصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک رخ می‌دهد. در نتیجه‌ی بهره‌کشی افراطی از منابع آب‌های زیر زمینی، اخلال در چرخه تغذیه و تخلیه این منابع حاصل می‌شود که در نهایت موجب اضمحلال سفره‌های زیرزمینی خواهد شد (Foroughnia, Nemati, Maghsoudi & Perissin, 2019).

در کشور ایران همانند سایر کشورهای در حال توسعه، وقوع پدیده فرونشست ناشی از افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی به جهت تامین نیاز روز افزون صنایع، شهرها و مناطق کشاورزی به آب، دارای پیشینه نسبتاً طولانی‌ای می‌باشد (Sharifikia, 2010). از طرف دیگر در مناطق شرقی و مرکزی ایران به دلیل رنج بردن از خشکسالی های متوالی، برداشت بی‌رویه از این منابع در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است که نتیجه آن وقوع فرونشست با نرخ بسیار بالا در دشت های این مناطق از جمله دشت‌های مشهد، نیشابور و جوین است (Khorrami, Abrishami & Maghsoudi, 2020).

در سالیان اخیر نگرانی‌های زیادی در زمینه مخاطرات پدیده فرونشست بر زیرساخت‌های شهری و غیر شهری ایجاد شده است (Foroughnia et al., 2019)، چراکه ظهور و گسترش این پدیده می‌تواند تاثیرات منفی بسیاری در درجات مختلف بر روی خطوط قطار های سریع‌السیر، مسیرهای حمل‌ونقل ریلی، جاده‌های بین‌شهری، تونل‌ها و پل‌ها داشته باشد (Gao et al., 2023). همچنین به دلیل توسعه سریع عارضه‌های خطی بزرگ مقیاس انسان‌ساخت[2] مانند خطوط راه‌آهن بین‌شهری و نقش کلیدی این مسیرها در توسعه اقتصادی کشورها، حمل و نقل کالا و جابجایی افراد در مسیرهای طولانی (Pietrzak & Pietrzak, 2019) و نیز احتمال وقوع خسارات جانی و مالی فراوان در صورت رخداد حادثه، ضرورت پایش پدیده فرونشست در محدوده خطوط ریلی در سراسر دنیا مورد توجه قرار گرفته است (Hooper, 2008; Berardino, Fornaro, Lanari & Sansosti, 2002 ; Luo, Zhou & Perissin, 2017).

روش تداخل‌سنجی رادار روزنه ساختگی (InSAR)[3] یکی از شناخته‌شده ترین روش‌های مطالعه فرونشست است (Luo et al., 2017). بر خلاف سایر روش‌های معمول اندازه‌گیری میزان فرونشست مانند ترازیابی دقیق و برداشت‌های GPS که هزینه‌بر، زمان‌بر و نیازمند حضور تکنسین در منطقه مورد نظر می‌باشند، روش InSAR به دلیل مستقل بودن از شرایط آب‌وهوایی و امکان بررسی پهنه‌های وسیع، میتوانند به صورت گسترده برای پایش این مخاطره محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گیرد (Ferretti et al., 2007). با این وجود دقت روش

1 Subsidence
2 large-scale manmade linear features
3 Interferometic Synthetic Aperture Radar

InSAR به وسیله عوامل مختلفی مانند خطاهای توپوگرافی، تاثیرات اتمسفری و خطاهای مربوط به مدار گردش ماهواره تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Hooper, Segall & Zebker, 2007; Ferretti, Prati & Rocca, 2001)؛ به همین دلیل تکنیک‌هایی نظیر روش SBAS[1] (Hooper, 2008; Berardino et al., 2002) و روش PSInSAR[2] مطرح شدند (Ferretti et al., 2001, Hooper et al., 2007). تکنیک SBAS برای مناطق مختلفی که دارای پوشش گیاهی هستند قابل اجراست؛ این تکنیک که بر اساس فاصله زمانی و مکانی کوتاه میان تصاویر راداری می‌باشد دارای مزایایی از قبیل کاهش نویز و افزایش هم‌بستگی تصاویر به وسیله کاهش خطاهای مرحله رفع ابهام فاز می‌باشد (Berardino et al., 2002). در سال‌های اخیر با معرفی الگوریتم NSBAS[3] روش جدیدی برای پرکردن شکاف زمانی -مکانی در شبکه تصاویر راداری ایجاد شد (Doin et al., 2011) که به وسیله آن امکان بررسی پدیده فرونشست با وجود شکاف در شبکه اینترفروگرامی در مناطقی نظیر زمین‌های کشاورزی که میزان همبستگی تصاویر کم است، فراهم خواهد شد (Shami, Azar, Nilfouroushan, Salimi & Reshadi, 2022).

محققان بسیاری با کمک بسته‌های نرم‌افزاری متن‌باز مانند SNAP (Veci, 2015)، GMTSAR (Sandwell, Mellors, Tong, Wei & Wessel, 2011)، ISCE (Rosen, Gurrola, Sacco & Zebker, 2012) و STAMPS (Hooper, 2004) فرایندهای مختلف پیش‌پردازش و پردازش تصاویر راداری از قبیل تولید اینترفروگرام یا آنالیز سری زمانی را به انجام می‌رسانند؛ علاوه بر این نرم‌افزارها، برخی دیگر از محققان ترجیح می‌دهند از معادل تجاری و غیر متن‌باز نرم‌افزارهای فوق از قبیل SARPROZ (Perissin, Wang & Wang, 2011)، GAMMA (Werner, Wegmüller, Strozzi & Wiesmann, 2000) یا SARScape ENVI (Sahraoui, Hassaine, Serief & Hasni, 2006) برای اهداف تحقیقاتی خود بهره ببرند. علارغم قابلیت‌های فراوان فراهم‌شده توسط داده‌های راداری سنجنده سنتینل-۱، بهره بردن از توانایی‌های این سنجنده به خصوص استفاده از آن در مطالعات زمانی-مکانی بزرگ مقیاس، نیازمند رویکردهای مختلفی برای پیش‌پردازش داده‌ها می‌باشد. همچنین پردازش و ذخیره‌سازی این داده‌ها نیز با چالش‌هایی از قبیل نیاز به زیرساخت‌های رایانشی قدرتمند همراه است (Zinno et al., 2015). به همین دلیل در سالیان اخیر تلاش قابل توجه‌ای برای رفع این مشکلات صورت گرفته که از بین آن‌ها می‌توان به سامانه LiCSAR[4] اشاره کرد. این سامانه توسط محققان موسسه COMET[5] توسعه یافته‌است که یکی از اهداف مهم آن، خودکار کردن بخشی از فرایند پیش‌پردازش داده‌های راداری و تسهیل مطالعات زمین‌شناختی طولانی مدت و بزرگ مقیاس می‌باشد (Lazecký et al., 2020).

1 Small Baseline Subset
2 Persistent Scatterer InSAR
3 New SBAS
4 Looking Into Continents from Space with Synthetic Aperture Radar
5 Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics

مطالعات متعددی در سال‌های گذشته بر جابجایی زمین با تمرکز اثرات آن بر روی عارضه‌های خطی مانند جاده‌ها و خطوط راه‌آهن صورت گرفته است. ینگ (Yang, 2015) با بررسی راه‌آهن سریع‌السیر شماره ۱[1] واقع در جنوب انگلستان به وسیله پردازش تصاویر سنجنده Envisat در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و روش PSInSAR نشان دادند که این مسیر در اکثر نقاط باثبات اما در برخی نقاط دارای پتانسیل فرونشست است. لو و همکاران (Luo et al., 2017) در تحقیقی بر راه‌آهن عبوری از داخل شهر تیانجین واقع در شرق چین، با پردازش تصاویر ماهواره TerraSAR-X به روش MT-inSAR[2] و در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ نشان دادند بخش‌هایی از این مسیر با نرخ سالانه بیش از ۲۵ میلیمتر در حال فرونشست بوده است. چانگ و همکاران (Chang, Sakpal, Elberink & Wang, 2020) در مطالعه‌ای بر خط راه‌آهن باری Betuwe در کشور هلند با تلفیق روش PS-inSAR و اسکن لیزری، این مسیر را به دو کلاس مناطق پرخطر و پایدار طبقه‌بندی کردند. نتیجه این مطالعه نشان داد که این مسیر در برخی نقاط با نرخ ۲۰ میلی‌متر بر سال در حال فرونشست است. پولکاری و همکاران (Polcari, Moro, Romaniello & Stramondo, 2019) با مطالعه بر خطوط قطار ناحیه لومباری در شمال ایتالیا به وسیله تصاویر راداری سنجنده Cosmo-SkyMed در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ نشان دادند که در برخی مناطق از این محدوده، زمین با نرخ میانگین سالانه ۷ میلی‌متر در حال فرونشست است. منگ و همکاران (Meng, Shu, Wu & Yang, 2021) با مطالعه خط راه‌آهن سریع‌السیر در شمال شرق کشور چین به وسیله روش PSInSAR نشان دادند که در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ این عارضه با نرخ میانگین سالانه ۷ تا ۱۳ میلی‌متر در حال فرونشست در راستای سنجنده است. چن و همکاران (Chen et al., 2021) با بررسی راه‌آهن سریع‌السیر بیجینگ-تیانجین واقع در کشور چین با پردازش داده‌های سنجنده‌های Envisat و TerrSAR-X و روش SBAS نشان دادند که در میانه‌ی مسیر، برخی نقاط تا نرخ سالانه ۷۰ میلی‌تر درحال فرونشست هستند. شامی و همکاران (Shami et al., 2022) با مطالعه راه‌آهن قم-کاشان واقع در کشور ایران به وسیله تصاویر سنجنده Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ و با روش NSBAS نشان دادند که در برخی مناطق این مسیر، فرونشست با نرخ ۲۳ میلی‌متر بر سال در حال رخ دادن است.

نتایج محققان فوق نشان‌دهنده این است که تداخل‌سنجی راداری یکی از روش‌های مرسوم و کاربردی برای مطالعه فرونشست زیرساخت‌ها است. این مطالعه به کمک الگورتیم نوین NSBAS و پردارش تصاویر راداری، به بررسی روند فرونشست در حریم ریلی راه‌آهن مشهد-سرخس می‌پردازد؛ چراکه این مسیر از جمله خطوط ریلی حائز اهمیت کشور ایران است که با واقع شدن درشمال شرق این کشور و اتصال شبکه ریلی کشورهای آسیای میانه به راه‌آهن سراسری ایران و ظرفیت جابجایی کالا به میزان ۴/۵ میلیون تن در سال، یکی از شاهراه‌های مهم ترانزیتی و همچنین وارادات و صادرات کشور ایران به حساب می‌آید. با توجه به عبور این خط راه‌آهن از دشت‌هایی با فعالیت گستره کشاورزی، وجود تعداد کثیری از پل‌های روگذر و زیر گذر و همچنین عدم انجام هرگونه مطالعه بلندمدت فرونشست در مسیر این راه‌آهن، لازم است با بررسی بیشتر پدیده فرونشست بر

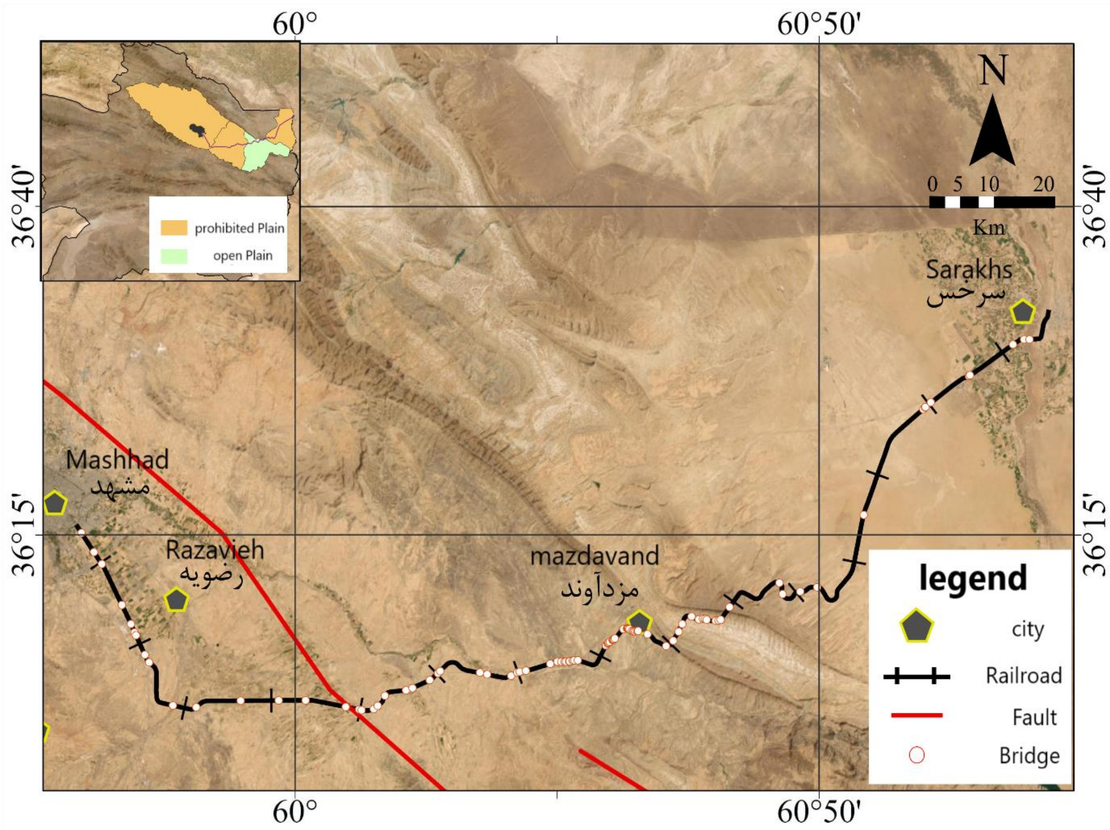
1 High Speed 1 (HS1)
2 Multi-Temporal InSAR

این ریل، نقاط مخاطره‌آمیز آن شناسایی شده تا در صورت لزوم، راهکارهایی در آینده برای علاج‌یابی محدوده‌های پرخطر ارائه شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

خط راه‌آهن مشهد-سرخس با طول حدودی ۱۹۵ کیلومتر که نزدیک به ۵ کیلومتر آن خارج از مرزهای ایران است، در منتهی الیه شمال شرقی کشور بین ´۳۸ °۵۹ تا ´۱۴ °۶۱ طول شرقی و´۱ °۳۶ تا ´۳۳ °۳۶ عرض شمالی، قرار گرفته است (شکل ۱). این مسیر ۳ سال پس از آغاز پروژه در تاریخ ۱۳۷۵ به بهره برداری رسید و از ویژگی‌های بارز آن می‌توان به احداث ۳ دهانه تونل مجموعاً به طول حدودی ۶ کیلومتر اشاره کرد. همچنین در طول محور خط راه‌آهن مشهد-سرخس، ۱۸ ایستگاه و ۲۷۰۰ متر پل احداث گردیده که شامل ۱۵ دستگاه پل بزرگ و ۳۸۶ دستگاه پل‌های متوسط و کوچک است(Parliament Research Center, 1996).




**شکل ۱- موقعیت راه‌آهن سرخس-مشهد در شمال‌شرقی استان خراسان رضوی**

**Fig. 1. Location of the Sarakhs-Mashhad railway in the northeast of Razavi Khorasan Province**

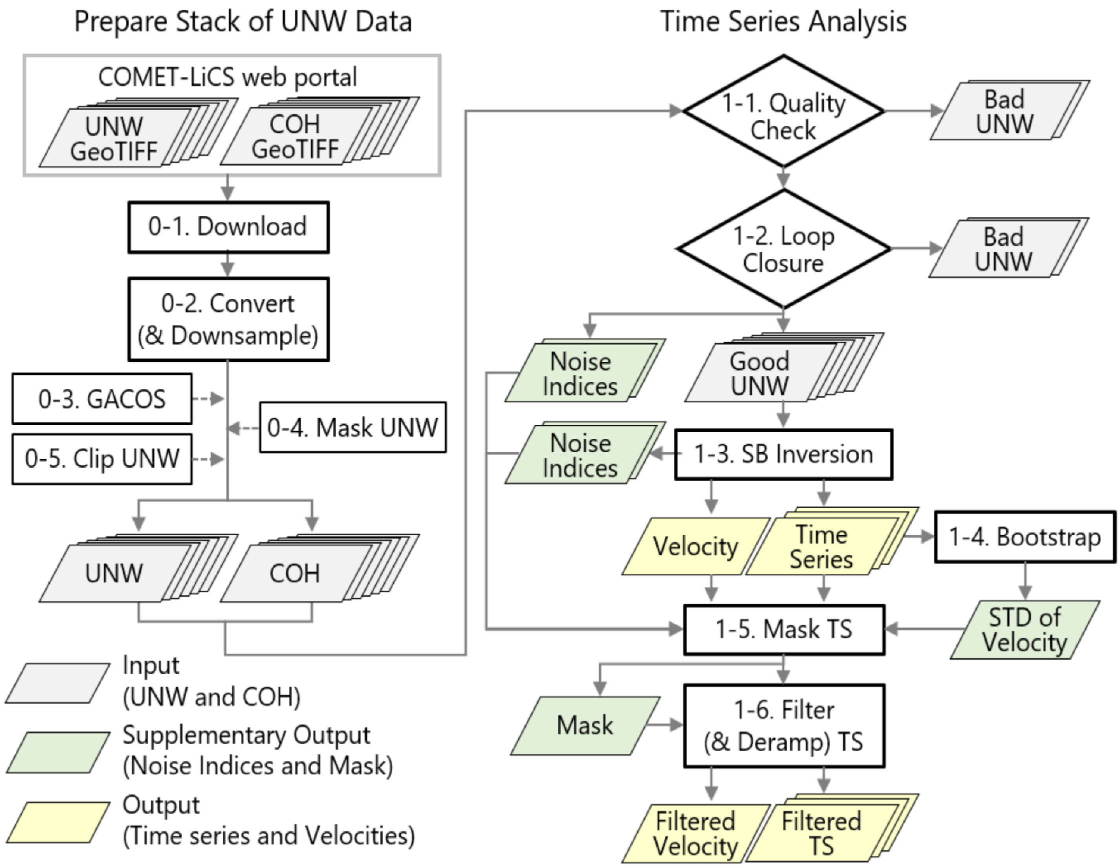
این راه‌آهن در حوضه آبریز قره‌قوم قرار گرفته است که اقلیم آن نیمه خشک تا خشک می‌باشد. حوضه آبریز قره‌قوم برخلاف مناطق جنوبی خراسان که از دشت‌های پهناور و کم ارتفاع تشکیل شده، ناحیه‌ای کوهستانی و مرتفع می باشد به‌گونه‌ای که چند دشت و واحد هیدروژئولوژیکی در میان رشته‌کوه قرار گرفته است و میزان بارندگی این حوضه از شمال غرب به جنوب شرق کاهش پیدا می‌کند (Ministry of Energy, 2010). همانطور که در شکل ۱ مشخص شده‌است، این خط‌آهن از ابتدای مسیر به ترتیب از چهار دشت مشهد، نریمانی، آق‌دربند و سرخس گذر می‌کند؛ حدود ۳۰ کیلومتر از مسیر ریل در دشت مشهد، ۲۵ کیلومتر در دشت نریمانی، ۳۲ کیلومتر در دشت آق‌دربند و حدود ۶۳ کیلومتر از آن در دشت سرخس واقع شده است که از این بین، بیش از ۱۶۰ کیلومتر از کل مسیر ۱۹۵ کیلومتری در دشت های ممنوعه یا ممنوعه بحرانی قرار گرفته است (Ministry of Energy, 2019).

## روش انجام پژوهش

در مطالعه حاضر از داده‌های آماده‌سازی‌شده سامانه LiCSAR در بازه زمانی ۲۳ ژانویه ۲۰۱۷ تا ۲۳ دسامبر سال ۲۰۲۲ استفاده شد. در این سامانه تصاویر خام سنجنده سنتینل-۱ به صورت فریم های ۲۵۰ x۲۵۰ کیلومتری کدگذاری و ذخیره شده‌اند (Lazecký et al., 2020). بدین‌صورت تعداد ۸۲۵ اینترفروگرام رفع ابهام شده[1] و فایل همدوسی[2] مربوط به محدوده مطالعاتی دانلود شدند. همانگونه که در شکل ۲ نمایش داده‌شده است، اینترفروگرام‌ها در مرحله آماده‌سازی با توجه به محدوده مطالعاتی ماسک و برش داده شدند و نواحی خارج از محدوده مطالعاتی از فرایند کنار گذاشته شد. از آنجایی که اثرات جوی با ایجاد نویز در مطالعات مکانی-زمانی بزرگ‌مقیاس ممکن است موجب پنهان شدن تغییرات واقعی سطح زمین شوند، در این مطالعه از داده‌های سامانه GACOS به منظور اصلاح اثرات جوی استفاده شد (Yu, Li, Penna & Crippa, 2018).

گام پردازش و آنالیز سری زمانی، دارای شش بخش اصلی است؛ با توجه به فلوچارت فوق، در گام نخست بایستی کیفیت داده‌ها بررسی و موارد نامناسب حذف شوند. برخی اینترفروگرام‌های اولیه به دلیل وجود برف یا پوشش گیاهی متراکم ممکن است دارای پیکسل‌هایی با میزان همدوسی پایین باشند؛ همچنین گاهی تعدادی از اینترفروگرام‌ها در بازه مطالعاتی می‌توانند به دلایل مختلف، ناقص باشند. برای بررسی این موارد، میانگین همدوسی هر اینترفروگرام محاسبه شد، سپس اینترفروگرام‌هایی که میانگین همدوسی آن‌ها کمتر از ۰/۳ بود، از فرایند پردازش کنار گذاشته شدند (Morishita et al., 2020). این داده‌ها ممکن است دارای خطاهایی‌رفع ابهام[3] باشند که موجب کاهش دقت و صحت در برآورد جابجایی سطح زمین خواهد شد؛ بنابراین لازم است در گام دوم پردازش، این عوامل شناسایی و از فرایند حذف شوند (Zhang, Fattahi & Amelung, 2019).

1 Unwrapped
2 Coherence
3 Unwrapping errors




**شکل ۲- فلوچارت مراحل مختلف مطالعه**

**Fig. 2. Flowchart of the various study stages**

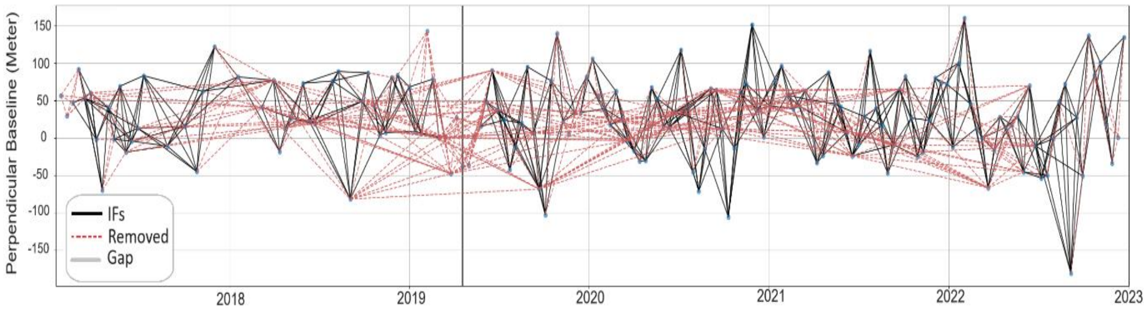
جهت شناسایی اینترفروگرام‌های دارای خطای چشمگیر، از الگوریتم حلقه‌ی بسته[1] استفاده شد؛ به طوری که از سه تصویر راداری $\varphi1$، $\varphi2$ و $\varphi3$، سه اینترفروگرام $\varphi12$، $\varphi13$ و $\varphi23$ تولید خواهد شد که حلقه فاز[2] آن‌ها به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Biggs, Wright Lu & Parsons, 2007):

$$\varphi123 = \varphi12 + \varphi23 - \varphi131 \quad (۱)$$

اگر هیچ خطای رفع ابهامی در اینترفروگرام‌ها وجود نداشته باشد، $\varphi123$ میبایست نزدیک به صفر باشد اما در صورتی که یک یا چند اینترفروگرام دارای خطا باشند، $\varphi123$ نزدیک به مضرب صحیحی از $۲\pi$ خواهد بود. با محاسبه $RMS$[3] حلقه فاز های تشکیل‌شده در کل بازه زمانی و قراردادن حد آستانه ۱/۵ رادیان برای خطای

1 Loop Closure
2 Loop phase or Loop Triplet
3 Root Mean Square

قابل چشم‌پوشی، اینترفروگرام‌های نامناسب شناسایی و از ادامه فرایند کنار گذاشته شدند (Morishita et al., 2020). در شکل ۳ شبکه اینترفروگرامی تصاویر، پیش از پالایش و پس از آن مشخص شده است.




**شکل ۳- شبکه اینترفروگرام تصاویر**
**Fig. 3. Image interferogram network**

همانطور که در شکل بالا نمایش داده شده است، خطوط قرمز نمایانگر اینترفروگرام‌های حذف‌شده و خطوط سیاه نیز اینترفروگرام‌های استفاده‌شده در فرایند پردازش است. همچنین خط تیره عمودی نشانگر شکاف در شبکه اینترفروگرامی فوق به دلیل حذف برخی از تصاویر می‌باشد.

در گام سوم، آنالیز سری‌زمانی بر اینترفروگرام‌های باقی مانده اعمال شد؛ این مرحله با اجرای الگوریتم NSBAS و با فرض خطی بودن جابجایی‌های ناشی از فرونشست بین هر دو برداشت داده راداری به اجرا رسید، که نتیجه آن نرخ سالانه و نرخ تجمعی فرونشست در بازه مطالعاتی خواهد بود. در همین گام نقطه مرجع[۱] به مختصات ۳۶/۳۹۶ درجه شمالی و ۶۰/۸۴۲ درجه شرقی انتخاب شد که معیار این انتخاب، پیکسلی با کمترین میزان RMS در کل حلقه‌های فاز است. در گام چهارم به کمک روش Boot Strapping با صد تکرار، انحراف‌معیار نرخ سالانه فرونشست محاسبه شد. در صورتی که این شاخص از حد آستانه تعریف‌شده بالاتر باشد، می‌تواند ناشی از غیرخطی بودن رفتار جابجایی زمین یا وجود نویز شدید در داده‌های ورودی باشد (Morishita et al., 2020). در گام پنجم پردازش، جهت حذف داده‌های پرت[۲] به کمک شاخص‌های نویز (جدول ۱) پیکسل‌های نامطلوبی که از حد آستانه مطلوبیت فراتر بودند، شناسایی و حذف شدند. در گام نهایی، فیلتر های مختلف مکانی-زمانی برای به حداقل رساندن اثرات نامطلوب از قبیل خطای رمپ مداری[۳] و اثرات جوی اعمال شد.

1 Referecne point
2 Outlier
3 Orbital ramp

**جدول ۱ - شاخص‌های نویز در گام فیلتر کردن خروجی**
**Table 1-Noise indices in the output filtering step**

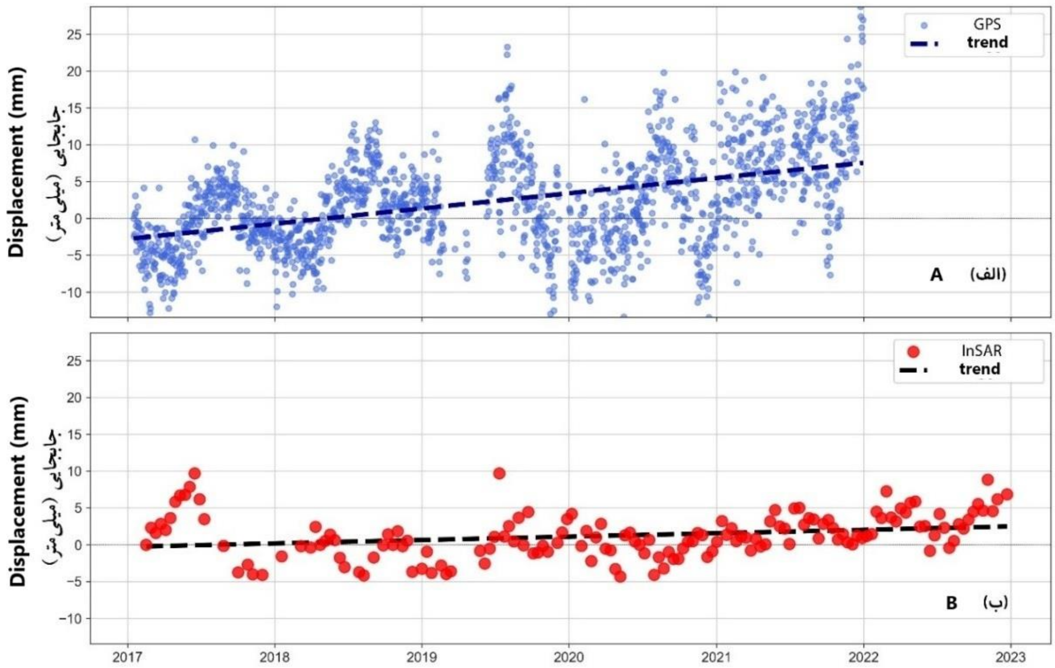
| حد آستانه<br>**Threshold** | شاخص های نویز<br>**Noise index** |
|---|---|
| 0.05 | کمترین میزان میانگین همدوسی<br>Threshold of average coherence |
| 1.5 | کمترین میزان نسبت تعداد اینترفروگرام‌های استفاده شده به تعداد تصاویر<br>Threshold of number of used unwrap data |
| 100 | بیشترین میزان انحراف معیار نرخ سالانه جابجایی (میلی‌متر بر سال)<br>Threshold of std of the velocity (mm/year) |
| 1 | بیشترین میزان فاصله زمانی اینترفروگرام دو تصویر (سال)<br>Threshold of max time length of connected network (year) |
| 10 | بیشترین تعداد شکاف و عدم پیوستگی در شبکه اینترفروگرامی<br>Threshold number of gaps in network |
| 5 | کمترین مقدار پیوستگی مکانی-زمانی (میلی‌متر)<br>Threshold of spatio-temporal consistency (mm) |
| 50 | بیشترین تعداد اینترفروگرام‌های فاقد حلقه‌ی فاز<br>Threshold of number of interferograms with no loop |
| 5 | بیشترین تعداد حلقه‌ی فاز دارای خطا<br>Threshold of number of loop error |
| 2 | بیشترین میزان RMS هر پیکسل در سری‌زمانی (میلی‌متر)<br>Threshold of number of loop error |

## نتایج و بحث

### صحت‌سنجی نتایج

برای راستی‌آزمایی نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری، از داده‌های ایستگاه‌های دائمی زمینی استفاده شد. بدین منظور جابجایی روزانه ایستگاه دائم ژئودینامیک سرخس به مختصات ´۰۹ °۶۱ طول شرقی و ´۳۲ °۳۶ عرض شمالی با سری‌زمانی حاصل از پردازش InSAR همان نقطه مقایسه گردید.

مقایسه مشاهدات حاصل از برداشت‌های GPS ایستگاه سرخس (شکل ۴-الف) و تداخل‌سنجی راداری همان نقطه (شکل ۴-ب) نمایان‌گر وقوع بالاآمدگی با نرخ کمتر از ۲ میلی‌متر بر سال است؛ علاوه بر آن، در دو نمودار فوق الگوی جابجایی فصلی به علت تغییرات در منابع آب منطقه نیز قابل مشاهده است. بنابراین داده‌های ایستگاه زمینی GPS، صحت داده‌های حاصل از تداخل‌سنجی راداری را مورد تایید قرار می‌دهد.



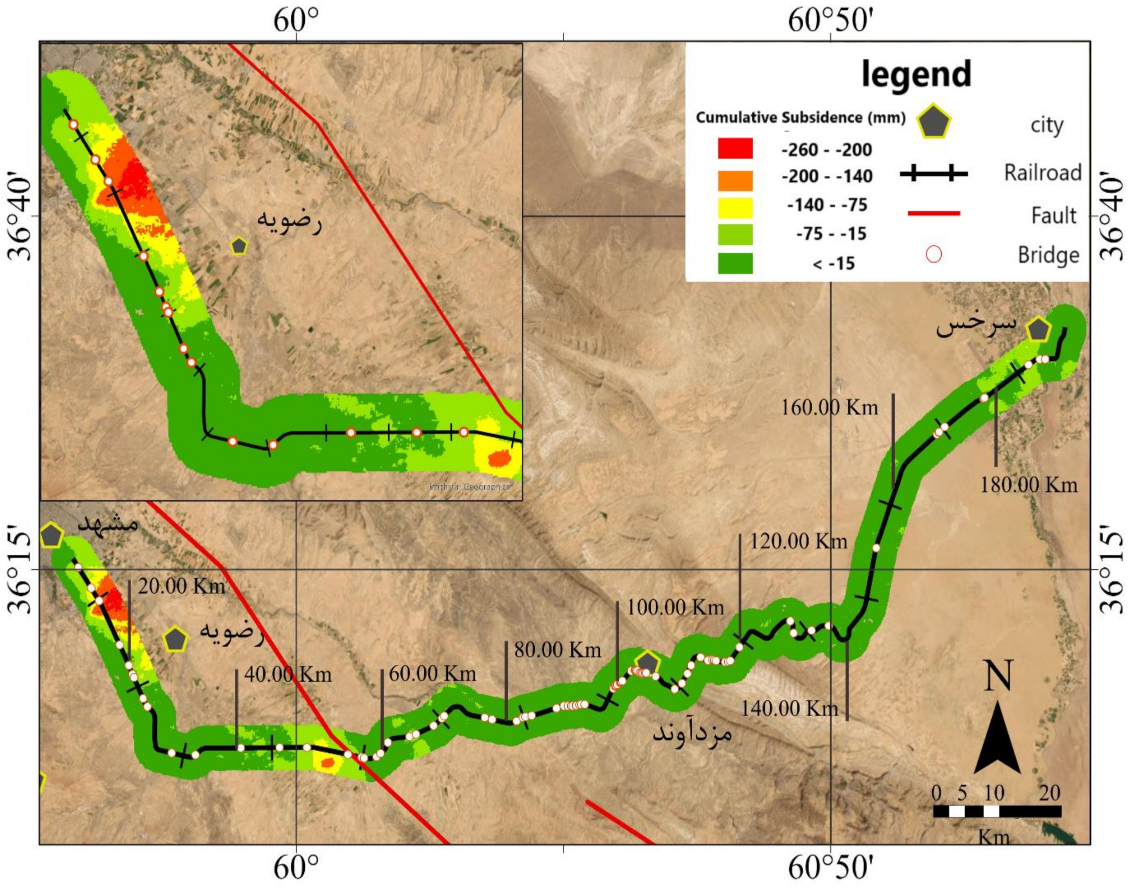

**شکل۴ - مقایسه جابجایی حاصل از GPS (الف) و InSAR (ب) در ایستگاه سرخس**

**Fig. 4. Comparison of displacement obtained from GPS (a) and InSAR (b) at Sarakhs station**

**ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم NSBAS**

برای تولید نقشه فرونشست محدوده مطالعاتی، پس از پالایش تصاویر و اینترفروگرام‌های نامناسب حاصل از آن‌ها از ۱۵۱ تصویر سنتینل-۱ استفاده شد (شکل ۵). بررسی میزان فرونشست در حریم سه کیلومتری خط راه‌آهن مشهد-سرخس در بازه ۲۳ ژانویه ۲۰۱۷ تا ۲۳ دسامبر سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرونشست در جنوب شرقی شهر مشهد و در ۲۰ کیلومتر ابتدای این مسیر مشاهده‌شده است. به طوری که در این بخش از مسیر، حداکثر میزان فرونشست در راستای سنجنده ۲۰۰ تا ۲۶۰ میلی‌متر برآورد شده‌است.

علاوه بر آن در حدود کیلومتر ۵۵ و ۱۹۰ از این مسیر به ترتیب حداکثر تا ۱۴۰ و ۷۵ میلی‌متر فرونشست برآورد شده است. سایر نواحی این مسیر عمدتاً فاقد فرونشست بوده یا میزان جابجایی چشمگیری برای آن برآورد نشده‌است.



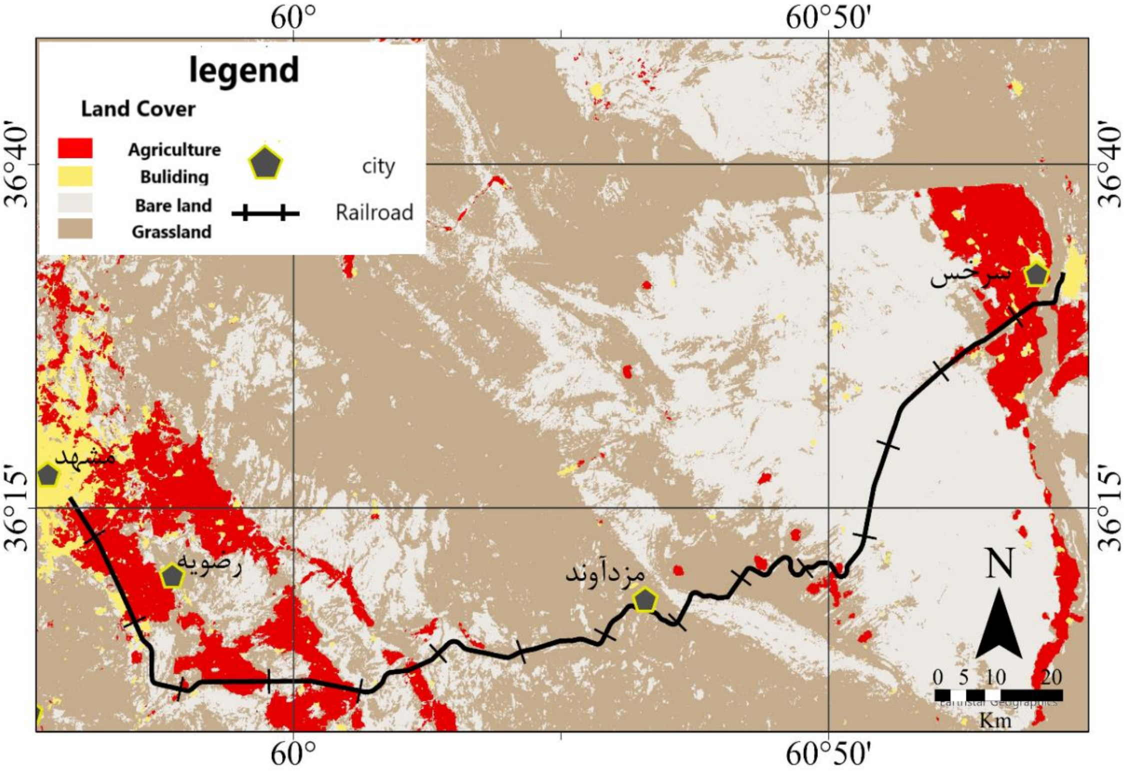

**شکل۵ – نقشه فرونشست تجمعی در حریم ۳ کیلومتری خط راه‌آهن (۲۰۱۷–۲۰۲۳)**

**Fig. 5. Cumulative subsidence map within a 3-kilometer buffer of the railway line (2017–2023)**

### بررسی و تحلیل ارتباط کاربری و پوشش اراضی با فرونشست در محدوده مطالعاتی

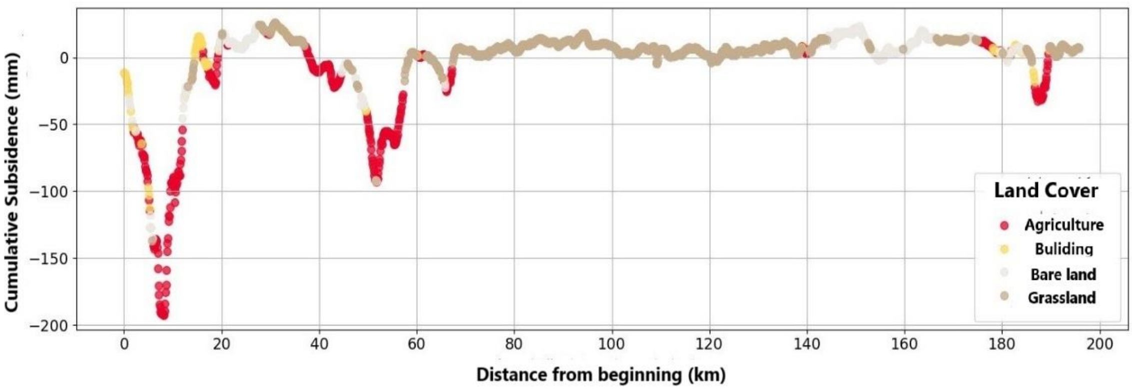
برای بررسی رابطه میان پوشش اراضی و فرونشست زمین، نقشه پوشش اراضی سال ۲۰۲۲ میلادی به کمک تصاویر ماهواره سنتینل-۲ با رزولوشن ۱۰x۱۰ متر با ۱۱ طبقه در سامانه گوگل ارث انجین تولید شد (Karra et al., 2021). سپس برای یکسان‌سازی تفکیک‌پذیری نقشه پوشش اراضی با نقشه فرونشست، این داده با الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه[1] به رزولوشن ۱۰۱ x۱۰۱ متر تبدیل و در نهایت نقشه پوشش اراضی با ۴ طبقه زمین زراعی، ساختمان، زمین بایر و مرتع برای محدوده تولید شد که در شکل ۶ موقعیت مکانی راه‌آهن در نقشه پوشش اراضی نمایش داده‌شده است.

1 Nearst Neightbour




شکل۶ – نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی
**Fig. 6. Land Cover map of the study area**

همانگونه که در شکل ۶ مشخص شده‌است، نتایج حاصله حاکی از وجود فعالیت‌های کشاورزی در کیلومتر صفر تا کیلومتر ۶۰ مسیر است؛ همچنین در انتهای مسیر و عمدتاً از کیلومتر ۱۸۰ به بعد نیز فعالیت های کشاورزی مشاهده می‌شود. عمده‌ی بخش میانی مسیر فاقد اراضی کشاورزی بوده یا فعالیت کشاورزی به صورت پراکنده وجود دارد.




شکل۷ – پروفیل ترکیبی فرونشست راه‌آهن با پوشش اراضی حریم ریلی
**Fig. 7. Composite subsidence profile of the railway with land cover of the rail buffer zone**

در شکل ۷ پروفیل فرونشست در راستای مسیر راه‌آهن به نمایش گذاشته‌شده است. جهت بررسی دقیق‌تر ارتباط فرونشست با کاربری اراضی، طبقه‌بندی انواع کاربری‌ها به پروفیل افزوده شد. با توجه به شکل ۷، از محدوده کیلومتر ۰ تا کیلومتر ۱۰ مسیر(که بیشترین میزان فرونشست در آن رخ داده است) بخش عمده‌ی کاربری محدوده، ذیل فعالیت‌های کشاورزی می‌باشد. ارتباط فعالیت‌های کشاورزی با وقوع فروشست در سایر نواحی مانند کیلومتر ۴۰ تا ۶۰ و ۱۸۵ تا ۱۹۰ نیز در این شکل قابل مشاهده است. از سوی دیگر، در بقیه طول مسیر عمده پوشش اراضی به صورت زمین بایر یا مراتع تنک است و به طول کلی فاقد فعالیت‌های کشاورزی متمرکز و متراکم می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد در طول راه آهن مشهد-سرخس، سه ناحیه دارای فرونشست قابل توجه هستند که از میان آن‌ها، در ناحیه اول مابین کیلومتر ۰ تا ۲۰ این مسیر، تا حدود ۲۰۰ میلیمتر فرونشست مشاهده شده است و در ناحیه دوم مابین کیلومتر ۵۰ تا ۶۰ نیز تا ۱۵۰ میلیمتر فرونشست برآورد شده است. بررسی نتایج مطالعات گذشته بر محدوده جنوب شرقی شهر مشهد و مقایسه آن با نتایج این تحقیق، نشان داد که نرخ فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۹ از کمتر از ۱۵ میلیمتر در سال، به بیش از ۴۰ میلیمتر در سال در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۳ افزایش پیدا کرده است. بررسی‌های گذشته در این منطقه نشان دادند که وقوع فرونشست، معلول دو عامل بهره برداری بی‌رویه از سفره‌های آب‌های زیرزمینی و جلوگیری از نفوذ آب برگشتی از بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شرب به آبخوان بوده است (Behniafar, Ghanbarzadeh & Eshraghi, 2010). مقایسه سری زمانی تراز آب چاه‌های پیزومتری با سری زمانی فرونشست در جنوب شرقی شهر مشهد که بخش ابتدایی راه‌آهن مشهد-سرخس در آن واقع شده است، نشان دهنده رابطه مستقیم افت تراز آب با فرونشست است؛ وجود این رابطه مستقیم بین رخداد پدیده فرونشست با افت قابل‌ملاحظه تراز آب‌های زیرزمینی می‌تواند تاثیرگرفته از فعالیت‌های کشاورزی متمرکز و برداشت بی‌رویه از چاه‌های آب در این منطقه باشد (Salehi Moteahd, Hafezi Moghaddas, Lashkaripour & Dehghani, 2019). علاوه‌بر آن، وجود چاه‌های غیرمجاز آب که فاقد هرگونه داده رسمی از قبیل میزان و الگوی برداشت است، در مزارع امری محتمل است؛ از این رو دسترسی به داده‌های مکانی قنات‌ها و گسل‌های محلی، موقعیت چاه‌ها و میزان برداشت آب در منطقه به مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار فرونشست کمک خواهد کرد. یکنواخت نبودن وقوع فرونشست و بالا بودن میزان تغییرات ارتفاعی زمین در بیست کیلومتر ابتدایی مسیر، از جمله مواردی ست که می‌تواند برای این مسیر ایجاد مخاطره کند. لازم به ذکر است که حدود ۲۰ درصد پل‌های خط راه‌آهن مشهد-سرخس در حدفاصل کیلومتر ۰ تا ۶۰ که دارای بیشترین نرخ فرونشست هستند، واقع شده‌اند؛ این موضوع بیانگر حساسیت بیشتر این بخش از مسیر و نشان‌دهنده لزوم پایش مستمر آن می‌باشد. مطالعه حاضر با در نظرگرفتن موارد فوق سعی بر آن داشت که کاربرد الگوریتم‌های جدید پردازش تصاویر راداری را برای تخمین و پیشبینی رخداد فرونشست نشان دهد. از آنجایی که این الگورتیم‌ها دارای خطای کمتر و دقیق و سهولت بکارگیری بالاتری نسبت به روش‌های

مرسوم تداخل‌سنجی راداری هستند، می‌توانند در صورت تلفیق با سایر داده‌ها از قبیل پوشش اراضی و شاخصه‌های جمعیتی و اقتصادی، کاربرد ویژه‌ای در پیشگیری و مدیریت مخاطرات محیطزیستی مانند پدیده فرونشست زیرساخت‌ها، داشته باشد.

## References


Behniafar, A., Ghanbarzadeh, H., & Eshraghi, A. (2010). Investigation of factors affecting subsidence in the Mashhad plain and its geomorphic consequences. *Zagros Perspective Geographical Quarterly*, *2*(5), 131–146. [In Persian]

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *40*(11), 2375–2383. https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792

Biggs, J., Wright, T., Lu, Z., & Parsons, B. (2007). Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska. *Geophysical Journal International*, *170*(3), 1165–1179. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03415.x

Chang, L., Sakpal, N. P., Elberink, S. O., & Wang, H. (2020). Railway infrastructure classification and instability identification using Sentinel-1 SAR and laser scanning data. *Sensors*, *20*(24), 7108. https://doi.org/10.3390/s20247108

Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Lei, K., Zhou, C., Si, Y., ... & Gao, M. (2021). Investigating land subsidence and its causes along Beijing high-speed railway using multi-platform InSAR and a maximum entropy model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *96*, 102284. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102284

Doin, M. P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., ... & Pinel, V. (2011). Presentation of the small baselin nsbas processing chain on a case example: The etan deformation monitoring from 2003 to 2010 using envisat data. In *Fringe Symposium*. https://ens.hal.science/hal-02185213

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *39*(1), 8–20. http://dx.doi.org/10.1109/36.898661

Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., ... & Rocca, F. (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *45*(5), 1142–1153. http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2007.894440

Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *74*, 248–258. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.018

Gambolati, G., & Teatini, P. (2015). Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resources Research*, *51*(6), 3922-3955. https://doi.org/10.1002/2014WR016841

Gao, F., Zhao, T., Zhu, X., Zheng, L., Wang, W., & Zheng, X. (2023). Land subsidence characteristics and numerical analysis of the impact on major infrastructure in Ningbo, China. *Sustainability*, *15*(1), 543. https://doi.org/10.3390/su15010543

Hooper, A. (2004). StaMPS (Stanford Method for PS) Manual. http://sismologia.ist.utl.pt/files/StaMPS_manual.pdf

Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, *35*(16), L16302. http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034654

Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *112*(B7), B07407. http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004763

Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., & Brumby, S. P. (2021). Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. In *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS* (pp. 4704–4707). https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499

Khorrami, M., Abrishami, S., & Maghsoudi, Y. (2020). Mashhad Subsidence Monitoring by Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *51*(6), 1187-1204. [In Persian] https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14300.5617

Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., ... & Wright, T. J. (2020). LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. *Remote Sensing*, *12*(15), 2430. https://doi.org/10.3390/rs12152430

Luo, Q., Zhou, G., & Perissin, D. (2017). Monitoring of subsidence along Jingjin inter-city railway with high-resolution TerraSAR-X MT-InSAR analysis. *Remote Sensing*, *9*(7), 717. https://doi.org/10.3390/rs9070717

Meng, Z., Shu, C., Wu, Q., & Yang, Y. (2021). Monitoring surface deformation of high-speed railway using time-series InSAR method in northeast China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *660*(1), 012011. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/660/1/012011

Minh, D. H. T., Van Trung, L., & Toan, T. L. (2015). Mapping ground subsidence phenomena in Ho Chi Minh City through the radar interferometry technique using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing*, *7*(7), 8543–8562. https://doi.org/10.3390/rs70708543

Ministry of Energy. (2010). *Updating the integration of water resources studies, Qareh Qom watershed, Volume 2: Reviews and general specifications*. Office of Basic Water Resources Studies. [In Persian]

Ministry of Energy. (2019). *Prohibited plains*. Office of Protection and Utilization of Water Resources and Subscriber Affairs. [In Persian]

Morishita, Y., Lazecký, M., Wright, T. J., Weiss, J. R., Elliott, J. R., & Hooper, A. (2020). LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing*, *12*(3), 424. https://doi.org/10.3390/rs12030424

Parliament Research Center. (1996). *Opening of the Mashhad-Sarakhs-Tejen railway line with a look at the situation of Sarakhs*. [In Persian]

Perissin, D., Wang, Z., & Wang, T. (2011). The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. In *34th International Symposium on Remote Sensing*. Sydney, Australia.

Pietrzak, O., & Pietrzak, K. (2019). The role of railway in handling transport services of cities and agglomerations. *Transportation Research Procedia*, *39*, 405-416. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.043

Polcari, M., Moro, M., Romaniello, V., & Stramondo, S. (2019). Anthropogenic subsidence along railway and road infrastructures in Northern Italy highlighted by CosmoSkyMed satellite data. *Journal of Applied Remote Sensing*, *13*(2), 024515. http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.13.024515

Rosen, P. A., Gurrola, E., Sacco, G. F., & Zebker, H. (2012). The InSAR scientific computing environment. In *Proceedings of the EUSAR 2012*. Nuremberg, Germany.

Sahraoui, O. H., Hassaine, B., Serief, C., & Hasni, K. (2006). Radar interferometry with Sarscape software. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 1-10.

Salehi Moteahd, F., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripour, G., & Dehghani, M. (2019). Land Subsidence and its Consequences in Mashhad City by Integrating Radar Interferometry and Field Measurements. *Journal of Engineering Geology*, *13*(3), 435-462. [In Persian] http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.3.435

Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011). Open radar interferometry software for mapping surface deformation. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, *92*(28), 234. https://doi.org/10.1029/2011EO280002

Shami, S., Azar, M. K., Nilfouroushan, F., Salimi, M., & Reshadi, M. A. M. (2022). Assessments of ground subsidence along the railway in the Kashan plain, Iran, using Sentinel-1 data and NSBAS algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *112*, 102898. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102898

Sharifikia, M. (2010). Investigation of the consequences of the subsidence phenomenon in residential lands and plains of Iran. *Journal of the Iranian Geological Engineering Association*, *3*(3–4), 43–58. [In Persian] https://www.jiraeg.ir/article_68238.html

Veci, L. (2015). Interferometry tutorial. *Array Systems. Available online: http://sentinel1.s3. amazonaws*.

Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., & Wiesmann, A. (2000). Gamma SAR and interferometric processing software. In *Proceedings of the ERS-ENVISAT Symposium*. Gothenburg, Sweden. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:28598270

Yang, Z. (2015). *Monitoring and predicting railway subsidence using InSAR and time series prediction techniques* (Doctoral dissertation). https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/6377/

Yu, C., Li, Z., Penna, N., & Crippa, P. (2018). Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *123*(10), 9202–9222. https://doi.org/10.1029/2017JB015305

Zhang, Y., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, *133*, 104331. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104331

Zinno, I., Elefante, S., Luca, C. D., Manunta, M., Lanari, R., & Casu, F. (2015). New advances in intensive DInSAR processing through cloud computing environments. In *Proceedings of the IGARSS 2015* (pp. 5264–5267). Milan, Italy. http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7327022